

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
28. Oktober 2004 (28.10.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer

WO 2004/093162 A2

(51) Internationale Patentklassifikation: H01L 21/00

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2004/000804

(22) Internationales Anmeldedatum:
15. April 2004 (15.04.2004)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
103 18 568.2 15. April 2003 (15.04.2003) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN [DE/DE]; Dezernat 5, SG 5.1, Mommsenstrasse 11, 01069 Dresden (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): RICHTER, Karola [DE/DE]; Gamigstrasse 7, 01239 Dresden (DE). FISCHER, Daniel [DE/DE]; Deubener Strasse 19, 01159 Dresden (DE).

(74) Gemeinsamer Vertreter: TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN; Sender, Frank, Dezernat 5, SG 5.1, 01062 Dresden (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

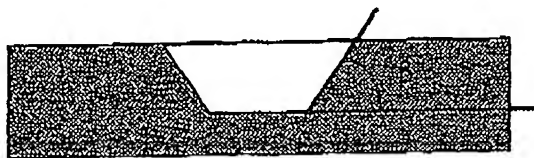
Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(54) Title: SILICON SUBSTRATE COMPRISING POSITIVE ETCHING PROFILES WITH A DEFINED SLOPE ANGLE, AND PRODUCTION METHOD

(54) Bezeichnung: SILIZIUMSUBSTRAT MIT POSITIVEN ÄTZPROFILIEN MIT DEFINIERTEM BÖSCHUNGSWINKEL UND VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG



(57) Abstract: The invention relates to a silicon substrate comprising positive etching profiles with a defined slope angle. Said silicon substrate is obtained by etching the silicon substrate that is covered with a mask and by carrying out the following steps: a) the silicon substrate is isotropically etched, the undercut u of the mask being approximately identical to the etching depth A_1 ; b) the etching depth is increased by means of anisotropic etching in alternating etching steps and polymerization steps during

which the undercut of the mask remains constant and the etching front follows a new course, the sidewalls of the structure being coated with a polymer in said step; c) the polymer is removed from the structure; and d) steps a) to c) are repeated until the predefined etching profile has been obtained. Also disclosed is a method.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Siliziumsubstrat mit positiven Ätzprofilen mit definiertem Böschungswinkel, erhältlich durch Ätzen des Siliziumsubstrates, das mit einer Maske abgedeckt ist und den folgenden Schritten: a) isotropes Ätzen des Siliziumsubstrates, wobei die Maskenunterätzung u annähernd gleich der Äztiefe A_1 ist; b) Vergrößern der Äztiefe durch anisotropes Ätzen mit alternierend aufeinanderfolgenden Ätz- und Polymerisationsschritten, wobei die Maskenunterätzung konstant bleibt und die Ätzfront einen neuen Verlauf erhält, und mit diesem Schritt die Seitenwände der Struktur mit einem Polymer belegt werden; c) Entfernen des Polymers von der Struktur; und d) Wiederholen der Schritte a) bis c) bis das vorgegebene Ätzprofil erreicht ist. Ein Verfahren ist beschrieben.

WO 2004/093162 A2

WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

10/553728

8/114
1

Siliziumsubstrat mit positiven Ätzprofilen mit definiertem Böschungswinkel und Verfahren zur Herstellung

Die Erfindung betrifft ein Siliziumsubstrat mit positiven Ätzprofilen mit definiertem Böschungswinkel. Die Erfindung betrifft weiterhin ein Verfahren zur Herstellung eines Siliziumsubstrates mit positivem Ätzprofil mit definiertem Böschungswinkel.

Mit dem Verfahren lassen sich

- Siliziumgießformen oder -prägewerkzeuge zur Herstellung von Polymerformteilen
- mikrofluidische Bauelemente mit Kanalsystemen und Düsen
- Bauelemente der Leistungselektronik mit Trench-Strukturen
- Spezielle Brückenstrukturen für Bauelemente der Elektronenmikroskopie o.dgl.

erzeugen.

Zahlreiche Bauelemente der Mikrosystemtechnik werden auf der Basis strukturierter Siliziumsubstrate hergestellt. Insbesondere betrifft das Bauelemente der Mikromechanik, Mikrofluidik und Leistungselektronik. Bei der Fertigung dieser Komponenten kommt dem Prozess der Siliziumstrukturierung eine herausragende Bedeutung zu.

In der Druckschrift J. P. John u. a.: J. Electrochem. Soc. Vol. 140, Nr. 9 (1993), 2622-2625 wird das nasschemische Ätzen von Siliziumsubstraten beschrieben. Dazu können beispielsweise Gemische aus Salpetersäure (HNO_3), Flußsäure (HF) und Wasser verwendet werden. Der Ätzprozess verläuft in diesem Fall vollkommen isotrop, d. h. die Maskenunterätzung ist annähernd so groß wie die Ätztiefe. Grenzen für die Anwendung dieses Verfahrens ergeben sich aus der fortschreitenden Minimierung der lateralen Strukturabmessungen, die sich aus der Forderung nach zunehmender Miniaturisierung von Bauelementen der Mikrosystemtechnik ergibt.

Eine anisotrope nasschemische Strukturierung von Silizium gemäß H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger, H. Baumgärtel: J. Electrochem. Soc., Vol. 137, No. 11, November 1990, 3612-3632 bzw. B. Kim, D. D. Cho: J. Electrochem. Soc., Vol. 145, No. 7, July 1998, 2499-2508 ist unter Verwendung von richtungsbevorzugenden alkalischen Ätzlösungen, wie Kalium-, Lithium- oder Natriumhydroxid möglich. Der anisotrope Charakter der Ätzung basiert auf den unterschiedlichen Auflösungsgeschwindigkeiten des Siliziums in den verschiedenen Kristallebenen. Die $\langle 111 \rangle$ -Ebene--

WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

2

wird am langsamsten abgetragen und wirkt deshalb als Strukturbegrenzung. Beim Ätzen von <100>-Silizium ergeben sich somit pyramidenstumpfförmige Vertiefungen bei denen die (111)-Flächen in einem definierten Winkel von $54,74^\circ$ die Strukturwände bilden. Bei einer Strukturbreite b_M in der Ätzmaske kann eine maximale Ätztiefe A_t von

$$A_t = \frac{b_M}{\sqrt{2}}$$

erzielt werden.

Da die Lage der Kristallebenen nach Winkel und Raster feststeht, sind die Realisierungsmöglichkeiten für Mikrostrukturen hinsichtlich lateraler Form und Querschnittsform der geätzten Gräben stark eingeschränkt.

Im Zusammenhang mit der rasanten Entwicklung der Halbleitertechnik wurden verschiedene plasmagestützte Silizium-Ätzverfahren entwickelt. Eine Vielfalt möglicher Anlagenkonzepte für Plasmaätzanlagen und eine Vielzahl von Prozessparametern ermöglichen die Variation der Ätzprozesse in einem weiten Bereich. Insbesondere weisen Plasmaätzprozesse prinzipiell den Vorteil auf, dass eine anisotrope Strukturierung unabhängig von der Kristallorientierung möglich ist.

Plasmachemische Siliziumätzprozesse basieren meist auf Flourchemie. Wenn Silizium beispielsweise in reinem SF_6 -Plasma (SF_6 : Schwefelhexafluorid) geätzt wird, verläuft der Prozess normalerweise isotrop, so dass die Maskenunterätzung annähernd gleich der Ätztiefe ist, siehe H. v. Boenig: Fundamentals of Plasma Chemistry and Technology, p. 174, The Research Institute of Plasma Chemistry and Technology Carlsbad, CA.

Eine Anisotropie des Ätzprozesses kann u. a. auf folgende Weise erzielt werden:

Verwendung von Chlor-Brom-Fluor-Chemie

Das laterale Ätzen wird verhindert durch Seitenwandpassivierung. Dazu wird die Zusammensetzung des Ätzgases so eingestellt, dass während des Ätzprozesses auch solche chemische Reaktionen stattfinden, die zur Bedeckung der Seitenwände mit ätzresistenten Schichten führen, siehe I. W. Rangelow, H. Löschner: J. Vac. Sci. Technol. B 13 (6), Nov/Dec 1995, 2394-2399 und K.-M.

WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

3

Chang, T.-H. Yeh, I.-C. Deng, H.-C. Lin: Journal of Applied Physics – Sept 1, 1996, Vol. 80, Issue 5, 3048-3055.

Problematisch ist bei diesem Verfahren der hohe Aufwand für die Sicherheitstechnik sowie Gasver- und -entsorgung zur Gewährleistung der Umweltverträglichkeit.

Verwendung von Fluorchemie in Verbindung mit Sauerstoff

Häufig wird ein Gemisch aus SF_6 und Sauerstoff als Ätzgas verwendet. In den Strukturen reagiert das Silizium mit Sauerstoff-Spezies zu SiO_x . Am Boden wird die Oxidschicht durch Fluor-Radikale, unterstützt durch Ionenbeschuss, schneller wieder abgetragen als an den Seitenwänden, so dass der Ätzprozess eine Vorzugsrichtung erhält. Ein optimales Verhältnis zwischen ausreichender Seitenwandpassivierung und hoher Ätzrate ist sehr schwer einstellbar. Die Kontrolle der Passivierung limitiert die erreichbare Ätztiefe, siehe I. W. Rangelow, H. Löschner: J. Vac. Sci. Technol. B 13 (6), Nov/Dec 1995, 2394-2399 u.a.

Einsatz von Cryoprozessen in Verbindung mit SF_6 -/ O_2 -Chemie

Eine hohe Konzentration an reaktiven Ätzspezies ist die Voraussetzung, um hohe Ätzraten zu erzielen. In diesem Fall findet aber auch an den Seitenwänden ein intensiverer Ätzangriff statt. Durch Kühlung der Substrate auf Temperaturen von ca. -110°C nimmt die Wahrscheinlichkeit spontaner Reaktionen zwischen Silizium und Fluor an den Seitenwänden drastisch ab. Mit der chemischen Reaktionsrate sinkt die laterale Ätzrate. Am Boden der Strukturen wirkt jedoch ein intensiver Ionenbeschuss. Dieser schafft Radikalplätze und regt reaktive Teilchen an, so dass weiterhin chemische Reaktionen stattfinden. Daraus resultiert eine deutlich größere vertikale Ätzrate, siehe I. W. Rangelow, H. Löschner: J. Vac. Sci. Technol. B 13 (6), Nov/Dec 1995, 2394-2399.

„Advanced Silicon Etch-Prozess“ (ASE)

Der ASE-Prozess basiert auf einem bekannten Verfahren nach DE 42 41 045 C1, das von Lärmer and Schilp entwickelt wurde. Es handelt sich dabei um einen zyklischen Prozess, der sich aus alternierenden Abscheide- und Ätzschritten zusammensetzt. Während der Abscheideintervalle findet eine Passivierung der gesamten Substratoberfläche statt durch Abscheidung einer Polymerschicht. Im Ätzintervall wird die Polymerschicht auf allen horizontalen Flächen durch Ionenbeschuss

WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

4

entfernt. Am Boden der Strukturen reagiert das freigelegte Silizium mit Fluor zu flüchtigen Reaktionsprodukten.

Charakteristische Eigenschaften des ASE-Prozesses sind:

- Realisierung von Ätztiefen von 10 ... 500 μm
- Erreichbares Aspektverhältnis: ≥ 25
- Böschungswinkel der Seitenwände nahe 90°
- Maskenunterätzung $\rightarrow 0$
- Beliebige laterale Form der Strukturen (z. B. Kanalstrukturen, Durchgangs-löcher durch Si-Wafer, Kamm-, Rasterstrukturen)
- Anwendung konventioneller Ätzmasken (z. B. SiO_2 , Fotoresist)
- Ätzrate: 3 ... 5 $\mu\text{m}/\text{min}$

Ausgehend vom gegenwärtigen Stand der Technik muss festgestellt werden, dass es bei der Siliziumstrukturierung gegenwärtig kaum technologische Möglichkeiten zur Variation des Ätzprofils gibt. Diese beschränken sich im wesentlichen auf folgende zwei Varianten:

- a) völlig isotropes Ätzen (z. B. mittels SF_6 -Plasma)

Eine typische Struktur ist in Bild 1 dargestellt.

- b) Realisierung von Siliziumstrukturen mit vollkommen senkrechten Seitenwänden bei

Maskenunterätzungen nahe Null (siehe Bild 2)

Die Aufgabe der Erfindung besteht deshalb darin, eine Lösung anzugeben, mit der in Silizium positive Ätzprofile mit definiertem Böschungswinkel β der Seitenwände erzeugt werden können.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe mit einem Siliziumsubstrat mit den im Anspruch 1 angegebenen Merkmalen gelöst.

Weiterhin wird die Aufgabe durch ein Verfahren mit dem im Anspruch 2 genannten Merkmalen gelöst. Gemäß dem Verfahren wird das mit einer Maske abgedeckte Siliziumsubstrat so isotrop geätzt, dass die Maskenunterätzung u annähernd gleich der Ätztiefe \bar{A}_i ist, anschließend wird die Ätztiefe so vergrößert, dass die Maskenunterätzung konstant bleibt und die Ätzfront einen neuen Verlauf erhält, wobei mit diesem Schritt die Seitenwände der Struktur mit einem Polymer belegt

WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

5

werden, danach wird das Polymer an den Seitenwänden der Struktur entfernt. Die vorgenannten Schritte werden so oft wiederholt, bis das gewünschte Ätzprofil und Ätztiefe erzeugt ist.

Vorteilhafte Varianten des Verfahrens ergeben sich aus in den Unteransprüchen genannten Merkmalen.

Das erfindungsgemäße Verfahren ist ein Plasmaätzprozess (PPE-Prozess - Positive Profile Etching Process) mit dem sich Siliziumsubstrate so strukturieren lassen, dass dabei positive Ätzprofile entstehen. Der Neigungswinkel der Seitenwände der geätzten Strukturen lässt sich im Bereich zwischen 60° und 88° durch geeignete Wahl der Prozessparameter definiert einstellen. In Abhängigkeit vom Aspektverhältnis, geöffneter (d. h. zu ätzender) Fläche und Prozessvariante können Ätzraten von $3...5 \mu\text{m}/\text{min}$ und Äztiefen bis zu $200 \mu\text{m}$ erzielt werden. Eine Begrenzung der erreichbaren Äztiefe ergibt sich lediglich aus der Standzeit der Ätzmaske, jedoch nicht aus prozessbedingten Parametern.

Die Erfindung wird nachfolgend an Hand von Ausführungsbeispielen näher erläutert. In den Zeichnungen zeigen:

- | | |
|---------|---|
| Bild 1 | eine typische Struktur nach einem isotropen Ätzprozess in reinem SF_6 -Plasma |
| Bild 2 | eine mittels ASE-Prozess erzeugte Struktur |
| Bild 3 | ein angestrebtes Ätzprofil mit definiertem Böschungswinkel β |
| Bild 4 | ein schematischer Aufbau einer Plasmaätzanlage |
| Bild 5 | ein Siliziumwafer mit Ätzmaske |
| Bild 6 | ein Ergebnis des isotropen Si-Ätzens im reinen SF_6 -Plasma |
| Bild 7 | ein Ergebnis nach isotropen Si-Ätzen und nachfolgendem modifiziertem ASE |
| Bild 8 | ein Freilegen der Seitenwände der geätzten Struktur mittels O_2 -Plasma |
| Bild 9 | eine Darstellung der Abhängigkeit des Böschungswinkels der geätzten Struktur vom Zeitverhältnis Z |
| Bild 10 | eine Struktur mit Böschungswinkel $\beta=89^\circ$, geätzt bei $Z=0,1$ |
| Bild 11 | eine Struktur mit Böschungswinkel $\beta=86^\circ$, geätzt bei $Z=0,167$ |
| Bild 12 | eine Struktur mit Böschungswinkel $\beta=83^\circ$, geätzt bei $Z=0,25$ |

WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

6

- Bild 13 eine Struktur mit Böschungswinkel $\beta=81^\circ$, geätzt bei $Z=0,33$
Bild 14 eine Struktur mit Böschungswinkel $\beta=77^\circ$, geätzt bei $Z=0,5$
Bild 15 eine Struktur mit Böschungswinkel $\beta=74^\circ$, geätzt bei $Z=0,67$
Bild 16 eine Struktur mit Böschungswinkel $\beta=66^\circ$, geätzt bei $Z=1$
Bild 17 eine Struktur mit Böschungswinkel $\beta=60^\circ$, geätzt bei $Z=2$
Bild 18 ein Prägewerkzeug aus Silizium
Bild 19 zwei Strukturen in Silizium mit Y-förmigem Ätzprofil
Bild 20 eine Siliziumstruktur für Flüssigkeitsspeicherzellen
Bild 21 ein Trench in Silizium mit leicht geneigten Seitenwänden
Bild 22 eine Metall-Brückenstruktur auf Silizium
Bild 23 eine Cu-Brückenstruktur, hergestellt mittels PPE-Prozess
Bild 24 eine freigelegte Cu-Brücke

Die Bilder 1 und 2 dienen zur Erläuterung des Standes der Technik. Bild 1 zeigt eine typische Struktur nach einem isotropen Ätzprozess in reinem SF_6 -Plasma. Bild 2 zeigt eine mittels ASE-Prozess erzeugte Struktur. Bild 3 zeigt schematisch ein angestrebtes positives Ätzprofil mit dargestelltem Böschungswinkel β .

Zur erfindungsgemäßen Strukturierung des Siliziumsubstrates entsprechend Bild 3 eignet sich eine Plasmaätzanlage der Firma Surface Technology Systems Limited (STS), Großbritannien. Eine solche Anlage ist in Bild 4 schematisch dargestellt.

An dieser Anlage können 4"- oder 6"-Silizium-Wafer bearbeitet werden. Das Beschicken des Plasmareaktors erfolgt über eine Schleuse 1. Die Silizium-Wafer 2 werden auf einer Substratelektrode durch eine mechanische Klammerung 3 gehalten und mittels Helium-Rückseitenkühlung gekühlt. Zur Vakuumherzeugung ist ein Pumpensystem, bestehend aus Drehschieber- 4 und Turbomolekularpumpe 5 vorgesehen. Der Prozessgasdruck lässt sich im Bereich von 1...15 Pa einstellen. Als Prozessgase lassen sich Stickstoff (N_2), Sauerstoff (O_2), Argon (Ar), Tetrafluormethan (CF_4), Schwefelhexafluorid (SF_6) und Octafluorcyclobutan (C_4F_8) über einen Gaseinlass 7 zuführen. Ein Hauptbestandteil der Anlage ist die hochdichte ICP-Plasmaquelle 6, in die eine HF-Leistung von maximal 1 kW eingekoppelt werden kann. Die Substratelektrode ist biasfähig und kann mit einer HF-Leistung von maximal 300 W beaufschlagt werden. Dazu ist ein

WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

7

Anpassnetzwerk 8 und ein HF-Generator 9 vorgesehen. Die Frequenz beträgt in jedem Fall 13,56 MHz. An der Anlage ist die Durchführung zyklischer Prozesse möglich.

Die Messung von Ätztiefen kann mit Hilfe eines Oberflächenprofilometers der Firma TENCOR INSTRUMENTS mit einer Genauigkeit von $\pm 5\text{nm}$ erfolgen.

Das erfindungsgemäße Verfahren, der sogenannte der PPE-Prozess wird zyklisch durchgeführt. Das Verfahren setzt sich aus drei Schritten zusammen, die sich stets in der gleichen Reihenfolge wiederholen. Das Verfahren weist folgenden Ablauf auf

Es wird vorausgeschickt, dass das Siliziumsubstrat mit einer Ätzmaske wie in Bild 5 versehen ist. Dabei kommen Maskenmaterialien wie Fotoresist, thermisches Siliziumoxid (SiO_2), Fotoresist und SiO_2 kombiniert sowie Metallmasken aus Aluminium oder Kupfer zum Einsatz.

Im ersten Schritt wird das Siliziumsubstrat in einem reinen SF_6 -Plasma gemäß der Darstellung in Bild 6 isotrop geätzt. Bei diesem Ätzschritt ist die Maskenunterätzung u annähernd gleich der Ätztiefe A_1 .

Im zweiten Schritt wird entsprechend Bild 7 das Siliziumsubstrat einem modifizierten ASE-Prozess unterworfen. Da der ASE-Prozess absolut senkrecht ätzt, wird die Ätztiefe vergrößert, aber die Maskenunterätzung bleibt konstant, die Ätzfront erhält einen neuen Verlauf. Die Seitenwände der Strukturen sind nach dem ASE-Prozess mit einem Polymer belegt.

Im dritten Schritt wird das Polymer an den Seitenwänden der Struktur durch O_2 -RIE entfernt und eine geätzte Struktur wie in Bild 8 erhalten.

Die Verfahrensschritte 1-3 werden nun so oft wiederholt, bis die gewünschte Ätztiefe erreicht ist. Durch Überlagerung der Ätzfronten, die aus den beiden Siliziumätzprozessen entsprechend den Schritten a) und b) resultieren, entstehen positive Ätzprofile mit Böschungswinkeln zwischen 60° und 88° .

WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

8

In der Tabelle 1 sind die Prozessparameter für jedes Intervall enthalten. In Tabelle 2 sind die Parameter des modifizierten ASE-Prozesses denen des bekannten Bosch-Prozesses gegenübergestellt. Eine reproduzierbare Einstellung eines gewünschten Böschungswinkels ist durch Wahl eines geeigneten Zeitverhältnisses Z für die Schritte 1 und 2 möglich.

$$Z = \frac{t_{SF_6-RIE}}{t_{ABE (Modifiziert)}}$$

Je größer der zeitliche Anteil des isotropen Ätzens im reinen SF_6 -Plasma ist, desto kleiner wird der Böschungswinkel. Bild 9 zeigt diesen Zusammenhang. Die Bilder 10 bis 17 zeigen Beispiele für reale Strukturen mit einem abnehmenden Böschungswinkel β , die dementsprechend geätzt wurden.

Ausführungsbeispiel 1

Strukturierte Silizium-Substrate können als Form zum Gießen von Bauteilen aus Polymeren o. a. gießfähigen Substanzen verwendet werden. Das Ergebnis der Siliziumstrukturierung ist von entscheidender Bedeutung für die Trennbarkeit der gegossenen Teile von der Form. Böschungswinkel der Seitenwände $< 90^\circ$ erleichtern die Entnahme der geformten Teile wesentlich. Bild 18 zeigt eine Siliziumstruktur mit einem Böschungswinkel von 88° , die als Prägewerkzeug zur Herstellung von Polymerteilen mit Kanalstrukturen für die Medizintechnik geeignet ist.

Ausführungsbeispiel 2

Mikrofluidische Bauelemente enthalten oft Kanalsysteme und Düsen, die durch entsprechende Strukturierung von Siliziumsubstraten erzeugt werden. Hierbei besteht zunehmend die Forderung, Strukturen mit komplizierten lateralen und vertikalen Formen zu realisieren. Dies beinhaltet u. a. die Erzeugung von Strukturen mit zusammengesetztem Ätzprofil oder von Ätzprofilen mit wechselndem Böschungswinkel. Beispiele dafür sind in den Bildern 19 a) und b) dargestellt.

Ausführungsbeispiel 3

Speicherzellen für Flüssigkeiten können beispielsweise eine Form haben, wie sie in Bild 20 zu sehen ist. Die dargestellten Strukturen wurden ebenfalls mit dem erfindungsgemäßen Verfahren erzeugt.

WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

9

Ausführungsbeispiel 4

Bei der Herstellung von Bauelementen der Leistungselektronik werden häufig tiefe Gräben in Silizium geätzt, die anschließend mit Dielektrika beschichtet bzw. mit Metallen zu füllen sind. Auf diese Weise sollen Kapazitäten oder Durchkontaktierungen erzeugt werden. Das homogene Beschichten und voidfreie Füllen der Trenches wird erleichtert, wenn der Böschungswinkel zwischen 85... 88° liegt. Bild 21 zeigt ein Beispiel für einen solchen Trench.

Ausführungsbeispiel 5

In der Elektronenmikroskopie werden spezielle Metall-Brückenstrukturen auf Silizium benötigt. Für einen solchen Fall kann auf einem Siliziumsubstrat eine freie Metallbrücke, die mit Kontakt-Pads verbunden ist, erzeugt werden (Bild 22).

Das Freilegen solcher Metallbrücken stellt für die Siliziumstrukturierung bisher ein Problem dar. Einerseits soll das Silizium auf der Rückseite des Metallstreifens bis zu einer Ätztiefe von 200...500 µm vollständig entfernt werden, andererseits wird eine minimale Unterätzung des SiO₂ unter den Kontaktpads angestrebt. Damit soll trotz Miniaturisierung der Bauelemente die Stabilität der Struktur gewährleistet bleiben. Die Bilder 23 und 24 zeigen mit dem Verfahren realisierbare Strukturen dieser Art.

WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

10

Bezugszeichenliste

- 1 - Schleuse
- 2 - Silizium-Wafer
- 3 - mechanische Klammerung
- 4 - Drehschieberpumpe
- 5 - Turbomolekularpumpe
- 6 - ICP-Plasmaquelle
- 7 - Gaseinlass
- 8 - Anpassnetzwerk
- 9 - HF-Generator

| Schritt | 1 | 2 | 3 |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| Name | SF ₆ -RIE | modifiziertes ASE | O ₂ -RIE |
| Funktion | isotropes Siliziumätzen | vertikales Siliziumätzen | Polymerentfernung |
| Prozeßgase | 130 sccm SF ₆ | Polymerabscheidung | Siliziumätzen |
| Prozeßgasdruck | 4 Pa | 85 sccm C ₄ F ₈ | 130 sccm SF ₆ |
| ICP-Leistung | 600 W | 1,3 Pa | 2,7 Pa |
| HF-Leistung an Substratelektrode | 12 W | 600 W | 600 W |
| Konstante Intervallzeiten | - | 12 W | 600 W |
| | | 5 s | 8 s |

Tabelle 1: Prozeßparameter für jedes Intervall des PPE-Prozesses

| Parameter | Standard-ASE-Prozeß nach Bosch-Patent | | Modifizierter ASE-Prozeß | |
|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| | Polymerabscheidung | Siliziumätzen | Polymerabscheidung | Siliziumätzen |
| Prozeßgase | 85 sccm C ₄ F ₈ | 130 sccm SF ₆ | 85 sccm C ₄ F ₈ | 130 sccm SF ₆ |
| Prozeßgasdruck | 2,7 Pa | 1,3 Pa | 1,3 Pa | 2,7 Pa |
| ICP-Leistung | 600 W | 600 W | 600 W | 600 W |
| HF-Leistung an Substratelektrode | - | 12 W | - | 12 W |
| Konstante Intervallzeiten | 8 s | 12 s | 8 s | 12 s |

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Parameter des patentierten Bosch-Prozesses und des modifizierten ASE-Prozesses

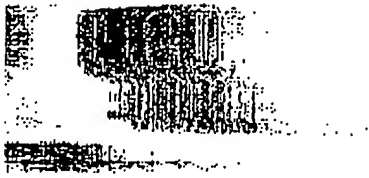
WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

12

Patentansprüche

1. Siliziumsubstrat mit positiven Ätzprofilen mit definiertem Böschungswinkel, erhältlich durch Ätzen des Siliziumsubstrates, das mit einer Maske abgedeckt ist und den folgenden Schritten
 - a) isotropes Ätzen des Siliziumsubstrates, wobei die Maskenunterätzung u annähernd gleich der Ätztiefe \bar{A}_i ist,
 - b) Vergrößern der Ätztiefe durch anisotropes Ätzen mit alternierend aufeinanderfolgenden Ätz- und Polymerisationsschritten, wobei die Maskenunterätzung konstant bleibt und die Ätzfront einen neuen Verlauf erhält, und mit diesem Schritt die Seitenwände der Struktur mit einem Polymer belegt werden,
 - c) Entfernen des Polymers von der Struktur, und
 - d) Wiederholen der Schritte a) bis c) bis das vorgegebene Ätzprofil erreicht ist.
2. Verfahren zum Plasmaätzen zur Erzeugung positiver Ätzprofile mit definiertem Böschungswinkel in Siliziumsubstraten, bei dem das Siliziumsubstrat mit einer Maske abgedeckt wird und dass
 - a) Siliziumsubstrat zunächst isotrop geätzt wird, so dass die Maskenunterätzung u annähernd gleich der Ätztiefe \bar{A}_i ist,
 - b) anschließend die Ätztiefe durch anisotropes Ätzen mit alternierend aufeinanderfolgenden Ätz- und Polymerisationsschritten vergrößert wird, so dass die Maskenunterätzung konstant bleibt und die Ätzfront einen neuen Verlauf erhält, wobei mit diesem Schritt die Seitenwände der Struktur mit einem Polymer belegt werden,
 - c) danach das Polymer an den Seitenwänden der Struktur entfernt wird, und
 - d) die Schritte a) bis c) so oft wiederholt werden, bis das vorgegebene Ätzprofil erreicht ist.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass das Siliziumsubstrat in einem SF_6 -Plasma isotrop geätzt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Vergrößerung der Ätztiefe durch einen anisotropen Ätzvorgang erfolgt, bei dem der Drücke für die Prozessgase 1,0 bis 5,3 Pa und die Intervallzeiten 3 bis 12 s betragen.



WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Entfernung des Polymers mittels eines O_2 -Plasmas erfolgt.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Böschungswinkel β im Ätzprofil durch Einstellung eines Zeitverhältnisses zwischen den Schritten a) und b) bestimmt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Schritt b) verlängert wird und daraus das Zeitverhältnis bestimmt wird.
8. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Schritt a) verlängert wird und daraus das Zeitverhältnis bestimmt wird.

Hierzu 8 Blatt Zeichnungen

10/553728

WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

1/8

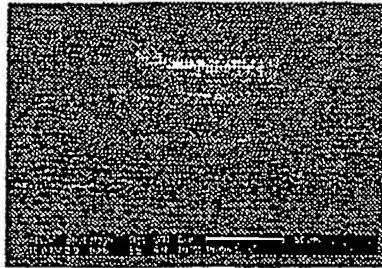


Bild 1

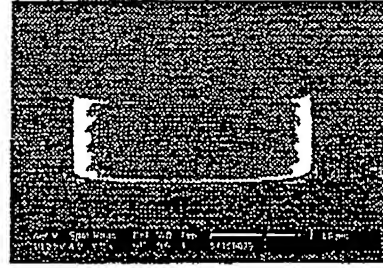


Bild 2

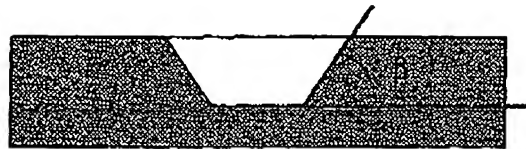


Bild 3

10/553728

WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

2/8

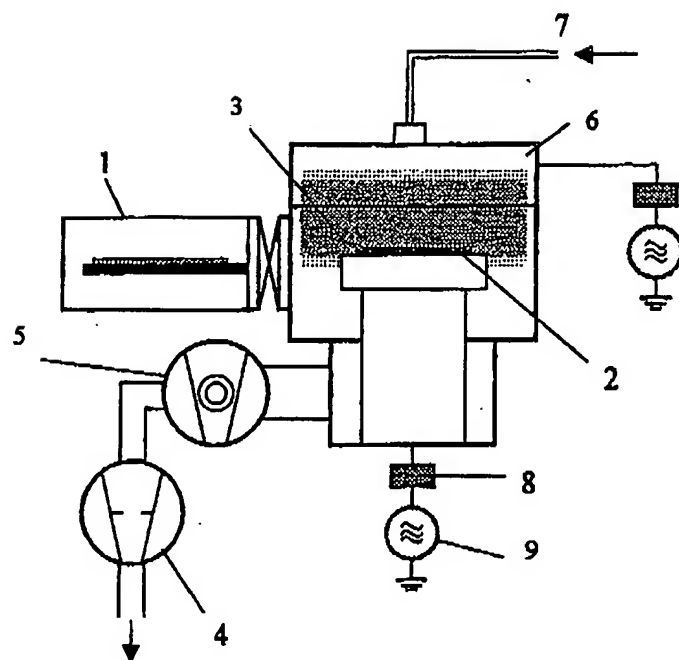


Bild 4

WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

3/8

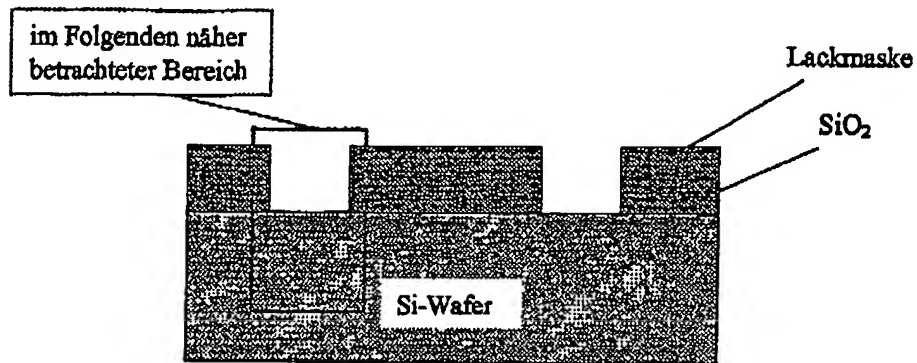


Bild 5

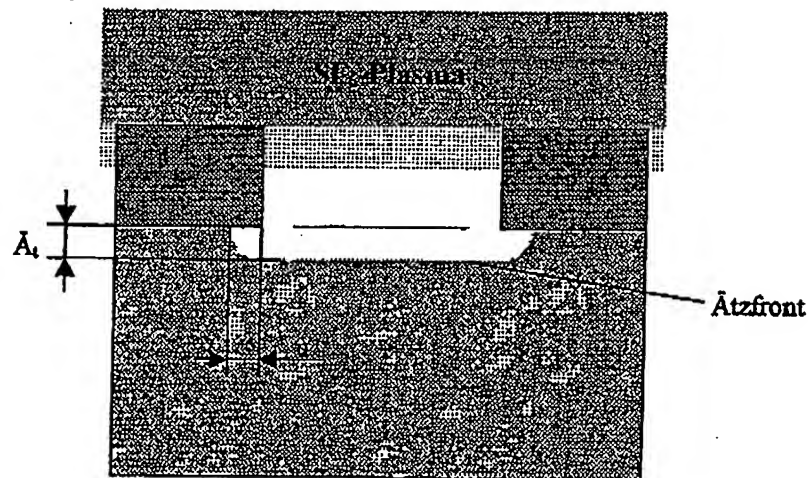


Bild 6

WO 2004/093162

10/553728
PCT/DE2004/000804

4/8

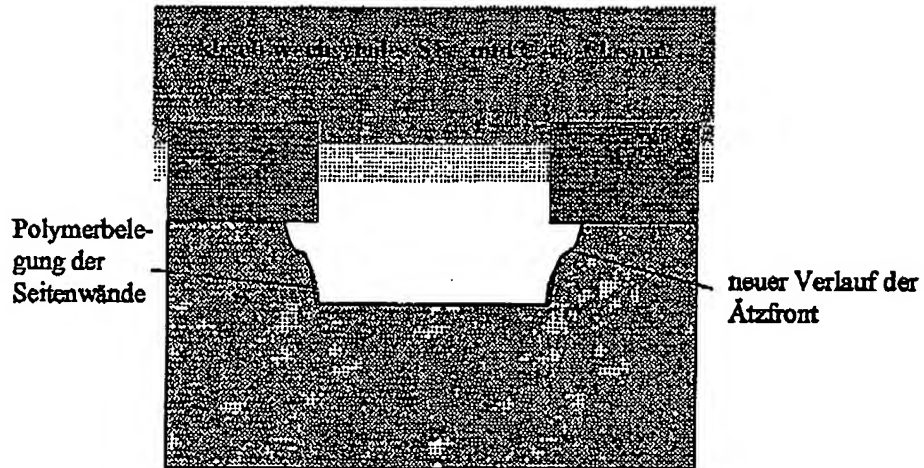


Bild 7

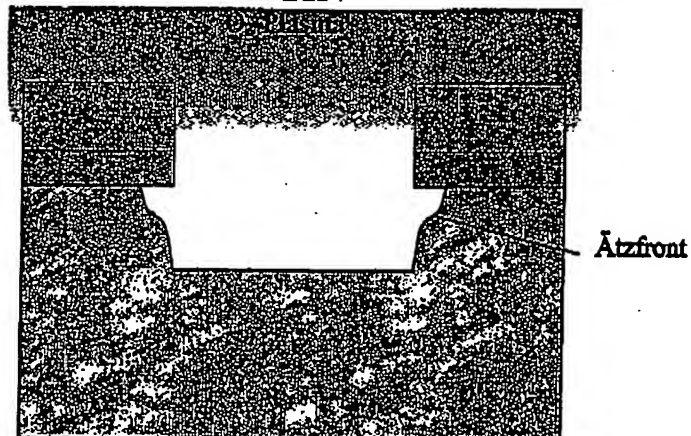


Bild 8

WO 2004/093162

10/553728
PCT/DE2004/000804

5/8

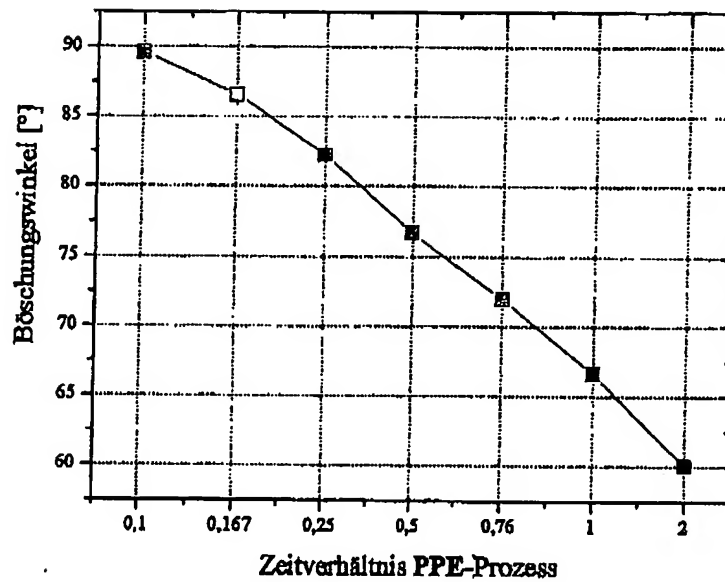


Bild 9: Abhängigkeit des Böschungswinkels der geätzten Strukturen vom Zeitverhältnis Z ($t_{SF6-RIR} / t_{ASE}$)

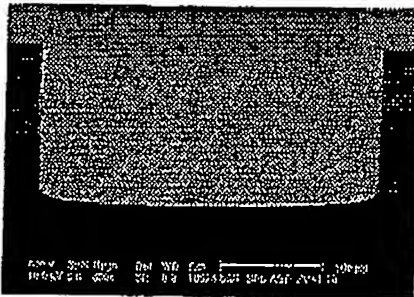


Bild 10: Struktur mit Böschungswinkel $\beta = 89^\circ$, geätzt bei $Z = 0,1$

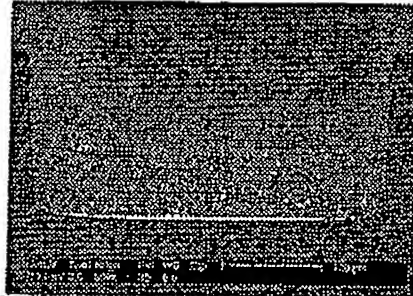


Bild 11: Struktur mit $\beta = 86^\circ$, geätzt bei $Z = 0,167$

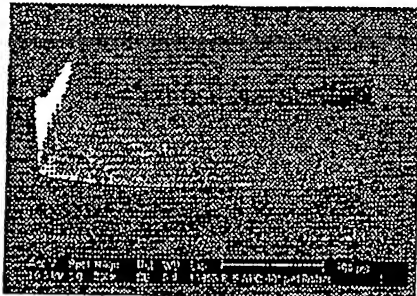


Bild 12: Struktur mit $\beta = 83^\circ$, geätzt bei

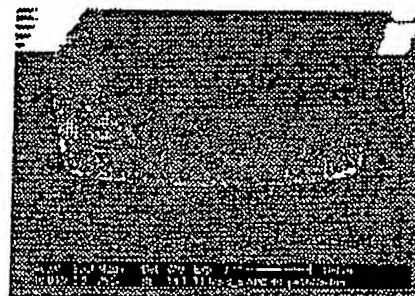


Bild 13: Struktur mit $\beta = 81^\circ$, geätzt bei

10/553728

WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

6/8

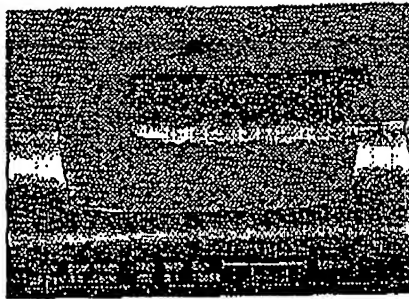


Bild 14: Struktur mit $\beta = 77^\circ$, geätzt bei $Z = 0,5$

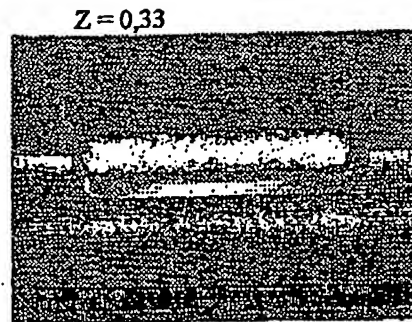


Bild 15: Struktur mit $\beta = 74^\circ$, geätzt bei $Z = 0,67$

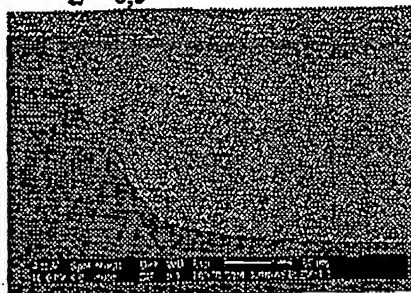


Bild 16: Struktur mit $\beta = 66^\circ$, geätzt bei $Z = 1$

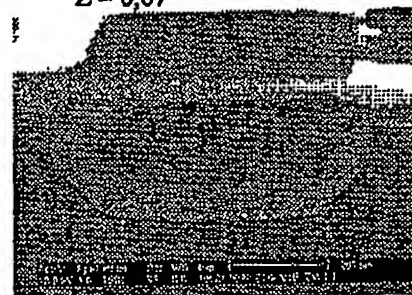


Bild 17: Struktur mit $\beta = 60^\circ$, geätzt bei $Z = 2$

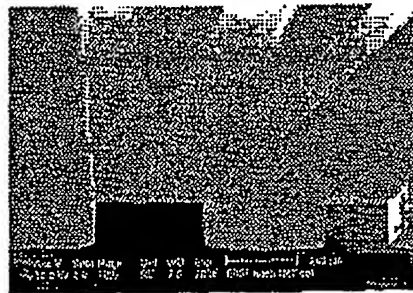


Bild 18: Prägewerkzeug aus Silizium

10/553728

WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

7/8

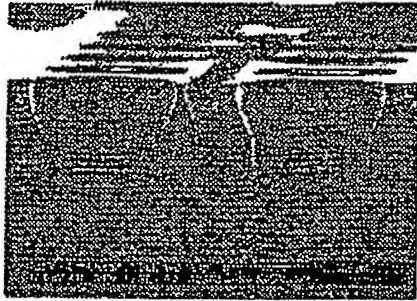


Bild 19 a)
Strukturen in Silizium mit Y-förmigem Ätzprofil

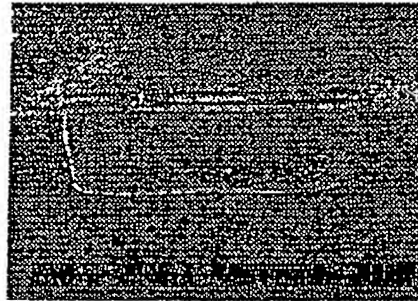


Bild 19 b)



Bild 20: Siliziumstrukturen für Flüssigkeitsspeicherzellen

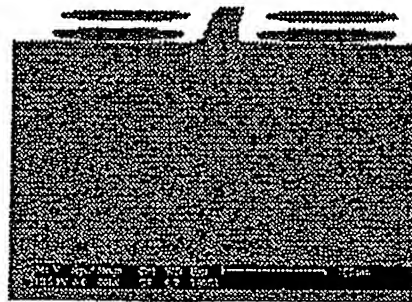


Bild 21: Trench in Silizium mit leicht geneigten Seitenwänden

WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

8/8

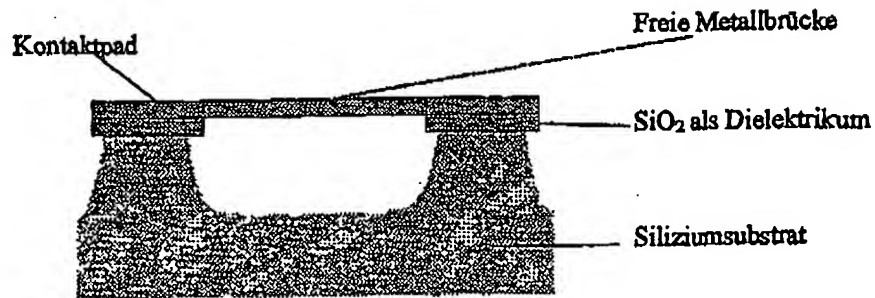


Bild 22: Metall-Brückenstruktur auf Silizium

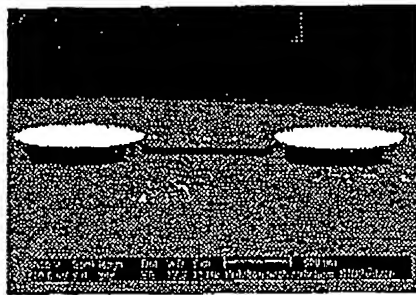
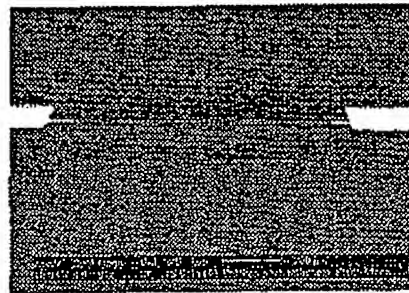
Bild 23: Cu-Brückenstruktur, Si-Ätzung
erfolgte mittels PPE-Prozeß

Bild 24: Freigelegte Cu-Brücke

10/553728

WO 2004/093162

PCT/DE2004/000804

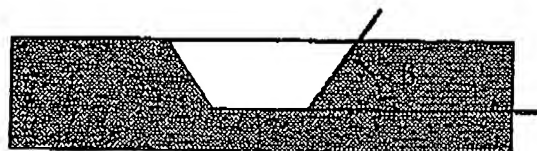


Bild 3